

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**СИСТЕМЫ синхронизации,  
формирования и обработки  
сигналов**

№4-2018 год

**Редколлегия:**

- Пестряков А.В.,** *д.т.н., профессор, декан факультета Радио и Телевидения МТУСИ*
- Кулешов В.Н.,** *д.т.н., профессор Московского энергетического института (ТУ), председатель российского отделения IEEE Circuit and System Society*
- Шинаков Ю.С.,** *д.т.н., профессор, зав. кафедрой радиотехнических систем МТУСИ*
- Варламов О.В.,** *д.т.н., начальник отдела ООИРиПА МТУСИ*
- Алёшин В.С.,** *к.т.н., с.н.с., МТУСИ*
- Аджемов Ар.С.,** *д.т.н., МТУСИ*

*Учредитель:  
ООО «ИД Медиа Паблшер»*

*Номер подписан в печать 03.12.2018 г.*

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                 |    |                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Пестряков А.В.<br>СИНХРОНИЗАЦИЯ. ИСТОРИЯ<br>И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ                                                                                                                                | 5  | Курантышев А.В., Дорогов Н.В.,<br>Кужли В.А., Давыдов М.П.<br>ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ<br>ПОТЕРЬ ИНФОРМАЦИОННОГО<br>СИГНАЛА ЗА СЧЕТ РАССЕЯНИЯ<br>НА АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦАХ                                                                                                    | 69  |
| Аристархов Г.М., Арихин О.В.,<br>Кириллов И.Н.<br>МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ<br>НА ОСНОВЕ ВСТРЕЧНО-ГРЕБЕНЧАТЫХ<br>СТРУКТУР С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ<br>ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ                               | 8  | Лаврушки И.Р., Лармонов А.А., Елизаров А.А.<br>АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ<br>ПРОТОКОЛА РАДИОЧАСТОТНОЙ<br>ИДЕНТИФИКАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ<br>СРЕДСТВ НА АВТОДОРОГАХ                                                                                                                      | 73  |
| Бирлюкова О.В., Корецкая И.В.<br>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАТЧИКА<br>УСКОРЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ<br>ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ<br>ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ<br>ЭКСПЕРИМЕНТА                                            | 13 | Митрофанов А.А., Сафин А.Р., Удалов Н.Н.<br>ФАЗОВЫЕ ШУМЫ ДВУХ ИДЕНТИЧНЫХ<br>СВЯЗАННЫХ СПИН-ТРАНСФЕРНЫХ<br>НАНООСЦИЛЛЯТОРОВ                                                                                                                                                     | 79  |
| Волчков В.П., Саминков В.Г.<br>АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ ПОДХОД<br>К ОПТИМАЛЬНОМУ СИНТЕЗУ<br>ВЕЩЕСТВЕННЫХ СИГНАЛЬНЫХ<br>БАЗИСОВ ВЕЙЛЯ-ГЕЙЗЕНБЕРГА                                                          | 19 | Лащевский А.Р., Иванов Д.В., Иванов В.А.,<br>Рябова Н.В., Рябова М.И., Овчинников В.В.<br>МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ<br>ИНОГРАММ НАКЛОННОГО<br>ЗОНДИРОВАНИЯ ВЧ РАДИОКАНАЛОВ<br>ДЛЯ ТРАСС РАЗЛИЧНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ<br>С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОГО<br>ИНОЗОНДА НА ПЛАТФОРМЕ USRP | 85  |
| Гольдштейн А.Б., Зарубин А.А., Елагин В.С.,<br>Белозерцев И.А., Онуфриенко А.О.<br>СИНХРОНИЗАЦИЯ ЗАДЕРЖКИ<br>ДЛЯ ОТТ УСЛУГ В СЕТЯХ LTE                                                          | 26 | Пешков И.В., Нечаев Ю.Б., Зайцева И.Н.<br>ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК<br>РАДИОПЕЛЕНГАЦИИ В ОБЪЕМНЫХ<br>АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ С НАПРАВЛЕННЫМИ<br>ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ МЕТОДОМ MUSIC                                                                                                                | 92  |
| Елагин В.С., Гольдштейн Б.С., Онуфриенко<br>А.В., Белозерцев И.А., Савельева А.А.,<br>МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТТ-СЕРВИСОВ<br>В МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЯХ В ЦЕЛЯХ<br>СИНХРОНИЗАЦИИ И ПРИОРИТЕЗАЦИИ<br>ТРАФИКА | 32 | Рыскин Ю.С., Терехов А.Н.,<br>Яблочников С.Л., Невзев О.П.<br>ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ<br>ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ-<br>ИСТОЧНИКОВ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ                                                                                                                                 | 101 |
| Зайцева И.Н., Барамыков А.И.<br>ТЕСТИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ<br>ПАРАМЕТРОВ АНТЕНН ЗЕМНЫХ<br>СТАНЦИЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ                                                                                  | 41 | Сахбиев Т.Р., Морозов О.Г., Фасхутдинов Л.М.,<br>Сахабутдинов А.Ж., Нуреев И.И.<br>ОПТИЧЕСКИЙ ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗАТОР<br>СПЕКТРА НА ОСНОВЕ<br>РАЗБАЛАНСИРОВАННОЙ АМПЛИТУДНО-<br>ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ                                                                                 | 106 |
| Казаков Л.Н., Царев А.Б.,<br>Соловьев Н.В., Махов М.И.<br>РАЗРАБОТКА ОСДМ СИСТЕМЫ<br>ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ<br>ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА<br>ГРУППЫ БПЛА                                                   | 51 | Соловьев А.Н., Егунов М.Ю.<br>ТЕХНОЛОГИЯ МОДУЛЯЦИИ<br>СИНТЕЗИРОВАННОЙ ЦИФРОВЫМ<br>МЕТОДОМ НЕСУЩЕЙ В СИСТЕМАХ<br>ПЕРЕДАЧИ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА                                                                                                                                   | 113 |
| Климов К.Н., Конов К.И.<br>МЕТОДИКА ВЫБОРА ПЕРЕМЕННОЙ<br>ИНТЕГРИРОВАНИЯ ПРИ ЧИСЛЕННОМ<br>МОДЕЛИРОВАНИИ ТРАЕКТОРИЙ<br>ЛУЧЕЙ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ                                                | 57 |                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |

|                                                                                                                                                                                                                                                               |     |                                                                                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Тимошенко А. Г., Бахтин А. А.,<br>Волкова Е. А., Осипенко Н. К.<br>ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ПОДАВЛЕНИЕ<br>PAPR В СИСТЕМАХ СВЯЗИ 5G                                                                                                                                | 117 | Чинакин А. В., Кочемасов В. Н., Пестряков А. В.<br>СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ<br>РАЗВИТИЯ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ<br>СВЧ-ДИАПАЗОНА                                                                                 | 132 |
| Хайруллин М. И., Лернер И. М., Ильин В. И.<br>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА<br>РЕАЛИЗАЦИЙ МОДУЛИРУЮЩЕЙ<br>ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ФМН-Н-СИГНАЛА<br>НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ОЦЕНКИ<br>ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ НА СИМВОЛ,<br>ВЫЗВАННОЙ МСИ В ЛИНЕЙНЫХ<br>ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ | 121 | Чиров Д. С., Виноградов А. Н., Воробьева Е. О.<br>ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО<br>АППАРАТА ДЕРЕВЬЕВ РЕШЕНИЙ<br>ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ВИДОВ ЦИФРОВОЙ<br>МОДУЛЯЦИИ РАДИОСИГНАЛОВ<br>В КОГНИТИВНЫХ СИСТЕМАХ ВЧ-СВЯЗИ | 140 |

## АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТОКОЛА РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА АВТОДОРОГАХ

**Лаврухин Илья Романович,**

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Департамент электронной инженерии, Москва, Россия,  
[irlavrukhin@hse.ru](mailto:irlavrukhin@hse.ru)*

**Ларонов Андрей Алексеевич,**

*Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН, Москва, Россия,  
[alarionov@ipu.ru](mailto:alarionov@ipu.ru)*

**Елизаров Андрей Альбертович,**

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Департамент электронной инженерии, Москва, Россия,  
[a.yelizarov@hse.ru](mailto:a.yelizarov@hse.ru)*

### Аннотация

Целью настоящей работы является исследование производительности протокола взаимодействия между считывателем и метками. В ходе работы проведен анализ стандарта EPC Class 1 Generation 2, который описывает технологию пассивной радиочастотной идентификации, в частности – протокол взаимодействия меток со считывателем, антиколлизционную процедуру опроса меток, доступ к различным областям памяти меток, параметры работы считывателя, вопросы безопасности. Для упрощения описания и логического разделения представленного функционала в стандарте вводятся два уровня: физический и логический. Для анализа производительности была построена модель системы радиочастотной идентификации на языке Python 3. Разработанное программное обеспечение позволяет имитировать процедуру опроса меток и на основе модели строить и анализировать зависимости количества успешно прочитанных меток от параметров (настроек) считывателя.

**Ключевые слова:** RFID, идентификация, автомобили, метки, считыватель, Python

### Введение

Высокая аварийность на автодорогах – острая социальная и экономическая проблема. В России, как и во многих странах мира, для снижения аварийности на автомобильных дорогах создают системы автоматической фиксации нарушений правил дорожного движения. Существующие системы, как правило, включают в себя радарное устройство для измерения скорости движения транспортного средства (ТС), а также оптическую фотокамеру для регистрации номерного знака транспортного средства нарушителя (то есть выполняют идентификацию нарушителя) [1, 2].

Однако, вышеперечисленная аппаратура имеет ряд недостатков, затрудняющих или даже делающих невозможным решение главной ее задачи – регистрации и идентификации автомобиля правонарушителя:

- при плохих погодных условиях (туман, снег, дождь) не всегда возможно корректно идентифицировать номерной знак;
- номерной знак также нельзя идентифицировать, если водитель сознательно скрывает его (например, нанося грязь или закрывая знак листом бумаги);
- аппаратура имеет очень высокую стоимость и требует регулярного обслуживания.

Из-за перечисленных недостатков вероятность идентификации автомобиля нарушителя может снижаться до 50 процентов и ниже.

Для решения перечисленных проблем можно использовать пассивную радиочастотную идентификацию (RFID) стандарта EPC Class 1 Generation 2. Для этого в точках фиксации нарушений размещаются RFID-считыватели, читающие метки, размещенные на автомобилях. По результатам экспериментов [3], такой подход позволяет увеличить процент идентифицированных транспортных средств до 92% и более, даже в крайне плохих погодных условиях. К преимуществам использования RFID следует отнести относительно низкую стоимость оборудования, а также возможность идентифицировать даже сильно загрязненные номерные знаки [4, 7-9].

### Цели и задачи работы

Система радиочастотной идентификации транспортных средств содержит считыватель, оснащенный одной антенной, и множество меток, размещенных на проезжающих транспортных средствах. Считыватель и метки работают по протоколу EPCClass 1 Generation 2. Требуется разработать модель протокола взаимодействия между считывателем и метками, позволяющую оценивать следующие характеристики системы:

1. вероятность идентификации меток;
2. среднее время до первой успешной идентификации метки;
3. вероятность коллизии (одновременный ответ двух и более меток).

Для этого требуется решить следующие задачи:

1. определить параметры протокола EPCClass 1 Generation 2, влияющие на исследуемые характеристики;
2. разработать алгоритм, моделирующий протокол взаимодействия между считывателем и метками;
3. провести численный расчет вероятности идентификации метки, среднего времени до первой успешной идентификации метки и вероятности коллизий в зависимости от выбранных параметров протокола и количества меток.

### Принципиальная схема RFID системы

Система радиочастотной идентификации (RFID, Radio Frequency Identification) представляет из себя беспроводную систему автоматической идентификации объектов, в которой при помощи радиосигналов считываются или записываются данные, хранящиеся в RFID-метках (RFID-tag).

Каждую RFID-систему можно представить в виде двух взаимодействующих компонентов: считывающего устройства (считыватель, RFID-reader) и транспондера, или метки (RFID-tag).

Структуру метки также можно представить в виде двух частей. Первая часть - чип, предназначенный для обработки и хранения информации, а также модуляции и демодуляции радиочастотного сигнала. Вторая часть - антенна, которая принимает и передает сигнал.

В пассивных системах радиочастотной идентификации СВЧ-диапазона (866-915 МГц) считыватель постоянно создает электромагнитное поле, которое необходимо для передачи энергии меткам [5]. Когда считывателю требуется передать сообщение, он передает модулированный сигнал, а в остальное время - обычную синусоиду (постоянный сигнал) на своей несущей частоте. Для передачи данных метка изменяет во времени коэффициент отражения своей антенны, тем самым осуществляя амплитудную модуляцию отраженного сигнала. Такой способ передачи данных называется модуляцией отраженного сигнала, или модуляцией обратного рассеивания (англ. Backscattering Modulation). Следует также отметить, что в пассивных системах метка не может инициировать обмен сообщениями, а передает данные лишь в ответ на команды от считывателя.

### Протокол взаимодействия между считывателем и метками

Для инвентаризации самых близких меток, считывателю нужно получить от каждой из всех сообщение, которое содержит идентификатор метки. Данная ситуация называется задачей множественного опроса, при котором в общем случае число меток неизвестно. Для решения подобной задачи считыватель мог бы передать широкополосный запрос, чтобы послать сообщение меткам в котором будет запрос, прислать считывателю свои идентификаторы. Однако после того, как метки стали бы отвечать, немедленно начались бы коллизии. Самый рациональный способ решить задачу множественного доступа в такой ситуации, при условии того, что метки не могут слышать друг друга, использование протокола дискретная ALOHA. Данный протокол адаптирован к использованию в EPCClass 1 Generation 2 [1].

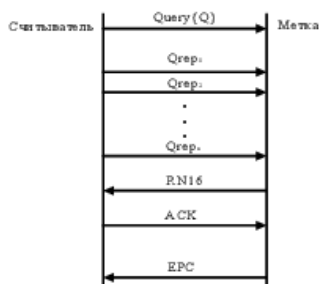


Рис. 1. Пример обмена сообщениями для идентификации метки

Последовательность сообщений, которые используются для идентификации метки, показана на рис. 1. В первый слот (слот 0) считыватель направляет сообщение Query, для запуска процесса. Каждое новое сообщение QRepeat подается в следующий слот. Считыватель сообщает меткам диапазон слотов, по которым можно рандомизировать передачи.

Каждая метка выбирает случайный слот, в котором она может отвечать. Однако, когда метки начинают отвечать, то не сразу посылают считывателю свои идентификаторы. Сначала они посылают короткое 16-битовое случайное число в сообщении RN16. Если коллизии отсутствуют, считыватель получает это сообщение и посылает собственное сообщение ACK. На этом этапе метка получает слот и посылает свой идентификатор EPC.

Обмен происходит таким образом потому, что идентификаторы EPC – длинные, поэтому коллизии, которые содержали бы в себе эти сообщения были бы очень накладными. Вместо этого используется короткий обмен, для проверки на безопасное использование слота меткой с целью переслать свой идентификатор. После успешной передачи своего идентификатора, метка временно перестает отвечать на новые сообщения Query, чтобы можно было идентифицировать остальные метки [6].

#### Модель механизма взаимодействия считывателя и меток стандарта EPC Class 1 Generation 2

На основе анализа стандарта EPCClass 1 Generation 2 были выделены основные параметры, влияющие на вероятность чтения метки, время до первого прочтения и вероятность коллизии. Тап (длительность символа 0, передаваемого считывателем), Q (определяет число слотов), M (число символов на передаваемый меткой бит, определяет способ кодирования меткой данных). Кроме того, на вероятность чтения существенно влияние оказывает BER (BitErrorRate), зависящий от соотношения сигнал-шум, однако, в данной работе особенности распространения сигнала не учитывались, в дальнейшем ошибки при передаче ответов метки моделировались с помощью вероятности доставки ответа целиком, задаваемой одним числом от 0 до 1. Также влияние оказывают различные параметры окружения, включая число меток, находящихся в зоне чтения.

Перечислив все этапы взаимодействия метки и считывателя, строится алгоритм взаимодействия метки со считывателем с заданными параметрами. При помощи такого алгоритма оценивается быстродействие в сей системы и влияние некоторых параметров на ее быстродействие.

В алгоритме присутствуют два глобальных цикла – первый в самом начале алгоритма, где идет проверка текущего раунда и в случае ложного значения завершается вся программа, второй цикл находится в конце алгоритма и он, в свою очередь, проверяет номер слота, максимальное число которого зависит от параметра Q. Если проверка прошла успешно, то происходит переход на следующий слот, иначе начинается новый раунд.

На входе данного алгоритма происходит инициализация заданных переменных. После чего происходит сравнение числового значения текущего раунда с общим их количеством. Если числовое значение текущего раунда больше либо равно значению общего числа раундов, то программа завершается. В обратном случае, имитируем передачу Query, прибавляем к общему модельному времени (отсчет начинается с 0) то время, которое занимает команда Query. После этого происходит «рандомизация» меток, то есть каждой метке присваивается случайное число, которое будет означать в каком слоте она будет отвечать. Максимальное число, которое может быть присвоено метке зависит от числового значения параметра Q, которое мы задаем в зависимости от количества меток – чем больше количество меток, тем больше параметр Q. Числовое значение этого параметра варьируется от 0 до  $2^Q-1$ . Затем создается массив в который заносятся значения тех меток, у которых присвоенное число равно 0. Чтобы понять какое число меток готово к ответу, будем измерять длину этого массива. В этом случае возможны 3 ситуации:

1. не отвечает ни одна метка,
2. отвечает одна метка,
3. отвечает более одной метки.

В первом случае к модельному времени прибавляется минимальное время между командами, после чего будет завершен текущий слот.

Во втором случае к модельному времени прибавляется несколько временных параметров, после этого происходит проверка – успешно ли принят RN16. В случае успешного принятия, происходит имитация передачи ACK, прибавление временных параметров к модельному времени, и проверка успешного принятия Response. После успешного принятого Response можно считать, что ответившая метка является прочитанной. Следующим шагом, в специальный массив заносится числовое значение общего количества прочитанной метки. После чего происходит завершение текущего слота. Он также произойдет, если хотя бы одно из вышеперечисленных условий будет ложным.

В третьем случае, когда отвечает более одной метки происходит увеличение числового значения счетчика коллизий, после чего будет завершен текущий слот.

После завершения слота происходит сравнение его значения с числом  $2^Q$ . Если значение слота меньше  $2^Q$ , то увеличивается модельное время и происходит переход на следующий слот, иначе увеличивается значение текущего раунда.

Для упрощения построения алгоритма ему на вход подаются более высокоуровневые параметры, вычисляемые на основе  $T_{a1}$  и  $M$ . Алгоритм использует следующие параметры, представленные в табл. 1.

Таблица 1

| Параметры алгоритма  |                                                                       |                               |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Название             | Описание                                                              | Допустимые значения           |
| Tquery               | длительность команды Query                                            | Любые значения<br>больше 0    |
| Tqer                 | длительность команды QRep                                             |                               |
| T1                   | минимальное время между окончанием команды и началом ответа           |                               |
| T2                   | минимальное время между окончанием ответа и началом следующей команды |                               |
| T3                   | минимальное время между командами                                     |                               |
| Tml6                 | длительность ответа                                                   |                               |
| Tack                 | длительность команды ACK                                              |                               |
| Tresponse            | длительность ответа                                                   |                               |
| K                    | число меток                                                           | Любое целое число<br>больше 0 |
| Q                    | числовое значение параметра Q                                         | Целые числа от 0 до 15        |
| probability_ml6      | вероятность успешного приема сообщения RN16                           | От 0 до 1                     |
| probability_response | вероятность успешного приема ответа                                   |                               |

#### Численные результаты исследования модели

В таблице 2 представлены числовые значения временных параметров протокола, которые используются при расчете.

Таблица 2

Численные значения временных параметров, в микросекундах

|        |        |
|--------|--------|
| Ta1    | 6,25   |
| T1     | 44,97  |
| T2     | 78,12  |
| T3     | 112,31 |
| Tack   | 150,00 |
| Tqer   | 59,38  |
| Tquery | 209,38 |
| Tresp  | 527,34 |
| Tml6   | 89,84  |

Как видно из графиков на рис. 2, вероятность появления коллизии растет и стремится к единице.

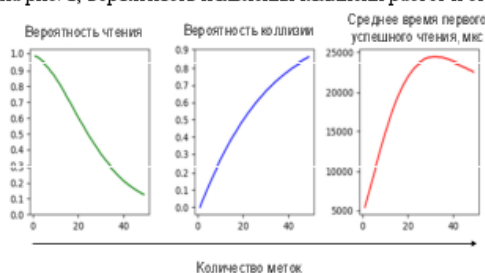


Рис. 2. Зависимость вероятности успешного прочтения метки, вероятности коллизий и среднего времени первого успешного чтения метки от количества меток.

Напротив, вероятность чтения метки с ростом их количества падает и стремится к нулю из-за растущего числа коллизионных слотов. Третий график показывает зависимость среднего времени до первого успешного прочтения метки от количества меток. Сначала график возрастает, так как растет число сло-

тов, в которых метки отвечают считывателю, такие слоты имеют большую длительность, чем пустые, длительность раунда возрастает и в среднем метка успешно передает свои данные позже. Затем количество коллизийных слотов становится слишком большим, большая часть меток попадают в коллизии. Длительность раунда становится короче из-за того, что длительность коллизийных слотов существенно меньше, чем длительность слота, в котором ведется успешная передача, следовательно, для тех меток, которые смогли успешно передать свои идентификаторы, время до передачи сокращается. Данное обстоятельство приводит к падению графика в его правой половине.

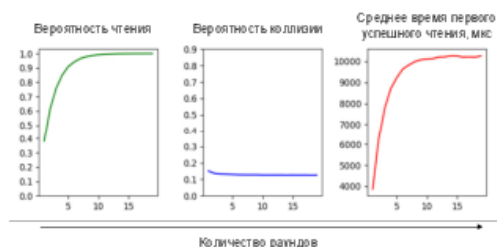


Рис. 3. Зависимость вероятности успешного прочтения метки, вероятности коллизий и среднего времени первого успешного чтения метки от количества раундов.

По первому графику на рис. 3 видно, что чем больше раундов будет проведено, тем выше вероятность прочтения метки. Также можно заметить, что максимальная вероятность чтения метки достигается к 10 раундам, следовательно, целесообразно настраивать считыватель на не менее чем 10 раундов. Вероятность коллизий не будет зависеть от количества проведенных раундов. Эта величина зависит лишь от количества меток. Среднее время до первой успешной идентификации метки сначала растет, но затем принимает замедляется и стремится к постоянному значению. Данный факт связан с тем, что примерно к 10 раунду считыватель успел прочитать как минимум один раз все метки, а повторные чтения не учитываются в данном графике.

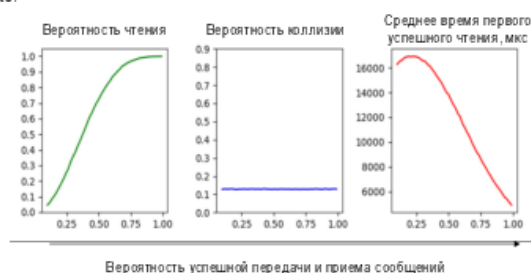


Рис. 4. Зависимость вероятности успешного прочтения метки, вероятности коллизий и среднего времени первого успешного чтения метки от вероятности успешной передачи и приема сообщений.

Вероятность успешного прочтения метки возрастет с ростом вероятности успешной передачи. Вероятность коллизий зависит только от числа меток, поэтому на данном графике остается постоянной. Среднее время стремится к минимальному значению, отличного от нуля (это минимальное значение достигается при вероятности успешной передачи ответа метки, равной 1, и зависит только от числа меток), если вероятность близка к единице. Чем меньше будет эта вероятность, тем больше потребуется времени на первое успешное чтение, так как даже если слоты будут неколлизионными, то вероятность прочтения будет очень мала, что можно увидеть на рис. 4.

### Выводы

В ходе работы были определены параметры протокола EPCClass 1 Generation 2, влияющие на исследуемые характеристики (вероятность идентификации меток, вероятность коллизий, среднее время до первой успешной идентификации метки), был разработан алгоритм, моделирующий взаимодействие меток и считывателя. На его основе было написано программное обеспечение на языке Python 3, которое, в свою очередь, имитирует опрос множества меток и на основе модели выстраивает и производит анализ зависимости количества успешно прочитанных меток от настроек считывателя.

Был проведен численный анализ построенной модели взаимодействия считывателя и меток. Полученные зависимости представлены в работе. К недостаткам модели можно отнести неточность описания деталей протокола и отсутствие расчета вероятности доставки сообщений в зависимости от состояния окружения. Улучшение предложенной модели является предметом дальнейшего исследования.

*Статья подготовлена в результате проведения исследования (№ 17-05-0009) в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета „Высшая школа экономики“ (НИУ ВШЭ)» в 2017 — 2018 гг. и в рамках государственной поддержки ведущих университетов Российской Федерации «5-100».*

#### Литература

1. EPC Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID/Ed. By EPC global Inc, 2015.
2. Минаиханов Р.Н. (общая редакция) Опыт применения систем видеофиксации нарушений правил дорожного движения (на примере Республики Татарстан). Казань: ГУ «НЦ БЖД», 2009.
3. *Pishnevsky V.M., Larionov A.A., Ivanov R.E. Analysis and Simulation of UHF RFID Vehicle Identification System / Communications in Computer and Information Science (CCIS). Distributed Computer and Communication Networks Heidelberg: Springer International Publishing AG, 2016. Vol. 678.*
4. *Вашневский В.М., Минаиханов Р.Н. Автоматизированная система безопасности на автодорогах с использованием RFID-технологий и новейших беспроводных средств // Проблемы информатики. 2012. № 1.*
5. *Елизаров А.А., Касторская А.С., Кухаренко А.С. Патент РФ № 2 408 115 на изобретение. Антенна для радиочастотной идентификации (варианты). Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. 2010. № 36.*
6. *Ларионов А.А., Иванов Р.Е., Вашневский В.М. UHF RFID in Automatic Vehicle Identification: Analysis and Simulation // IEEE Journal of Radio Frequency Identification. 2017. Vol.1, Issue: 1, pp. 3-12.*
7. *Вашневский В.М., Ларионов А.А., Целиван Ю.В. Анализ и исследование методов проектирования автоматизированных систем безопасности на автодорогах с использованием новых широкополосных беспроводных средств и RFID технологий // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2012. Т. 6. № 7. С. 48-54.*
8. *Вашневский В.М., Кришнамурти А., Кольчев Д.В., Ларионов А.А., Иванов Р.Е. Методы исследования и проектирования широкополосных беспроводных сетей вдоль протяженных транспортных магистралей // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 5. С. 9-15.*
9. *Елизаров А.А., Нестеренко А.Н., Закирова Э.А., Кухаренко А.С. Исследование микрополосковой антенны для RFID-технологии на круговой меандр-линии // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 9. С. 37-42.*